

核电枞树型汽轮机叶片根部的 超声相控阵检测技术

张益成,邱进杰,蔡家藩,聂 勇,卢 威

(中核武汉核电运行技术股份有限公司,武汉 430223)

摘 要:建立了一套针对核电枞树型汽轮机叶片根部的超声相控阵检测技术。通过对叶片的受力分析,了解叶片应力分布,关注缺陷最易产生的部位;通过声场仿真量化相控阵探头各参数与探头激发声场间的关系,设计叶片检测专用的相控阵探头;再结合现场检测条件,针对不同检测部位设计相应的扫查方式,实现超声波对第一齿的全覆盖扫查;在模拟试块上进行检测试验,验证检测工艺的有效性。将检测技术应用于工程实际,证明了该技术的可靠性。

关键词:汽轮机叶片;超声相控阵;应力分布

中图分类号: TG115. 28, TB553

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)09-0038-04

Phased Array Inspection for Nuclear Power Fir Style Turbine Blade Root

ZHANG Yi-cheng, QIU Jin-jie, CAI Jia-fan, NIE Yong, LU Wei

(China Nuclear Power Operation Technology Corporation Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: Based on the phased array technology, the inspection technique was established for nuclear power fir style turbine root. By analyzing the stress of blades, the most probable area of defect was found. The sound field simulation was applied to quantify the relationship between parameters of phased array probe and the probe acoustic field generated. And the relationship was used as a basis for designing a dedicated phased array probe. Scanning modes were designed for different inspection zone. The experiment was performed on the specimen to prove the effectiveness of the technology. The corresponding phased array inspection technology was formed eventually. The actual project will be applied to prove the reliability of the inspection techniques.

Keywords: Nuclear power turbine; Phased array; Stress distribution

汽轮机是核电站常规岛的主要部件,汽轮机转子是运行要求最高、工作量最大的部件。单个转子上装有过千的叶片,每一个叶片都在极端恶劣的环境下飞速转动,同时承受着极大的应力。汽轮机转子旋转过程中的应力集中于叶片根部与转子轮槽的连接处,使得运行过程中导致叶片根部裂纹的产生,最终发生破坏。因此汽轮机叶片结构的完整性是关系到汽轮机能否安全稳定运行的关键因素。为防微杜渐,需要一套完善的无损检测技术对核电汽轮机叶片的结构完整性进行评估。

枞树型的汽轮机叶片间的间隙狭小,一般末级叶片间隙不足 60 mm,次末级叶片间隙不足 50 mm,在空间上限制了超声检测的实施。其次,叶身为变截面流线型结构,如图 1 所示,增加了超声检测的难

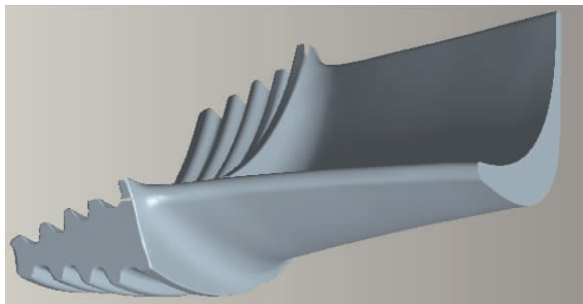


图 1 次末级叶片

收稿日期: 2013-09-06

作者简介: 张益成(1984—),男,工程师,博士研究生,主要从事无损检测相关技术研究。

度。因此,目前在役过程中所使用的常规无损检测方法^[1](超声表面波和渗透)都只能对叶片表面和叶片根部端面进行检测,对根部内部的缺陷无法检测。相控阵检测技术可以实现在有限的检测空间实现根部的全覆盖检测,因此开展汽轮机叶片根部的超声相控阵检测技术研究工作,对于提高叶片根部的缺陷检出率,保证核电机组的安全运行具有重要的意义。

1 检测工艺设计

1.1 重点检测区域分析

在汽轮机运行过程中,叶片根部受到的应力主要有离心拉应力,蒸汽弯应力和偏心弯应力。通过计算机模拟进行叶片应力分析,结果如图2所示。由图可见根部第一齿(靠近叶片)处应力最大,第四齿(远离叶片)的应力最小;第一齿两端(进气侧和出气侧)的应力最大。因此,汽轮机转动过程中,第一齿处最易产生缺陷,尤其在进气侧和出气侧的位置。所以为了最大限度地保证叶片安全运行,需对叶片第一齿实现全覆盖检验,进气侧与出气侧是重点关注区域。该类型叶片材料为0Cr17Ni4Cu4Nb,末级叶片根部尺寸大约为380 mm×72 mm×120 mm,而次末级叶片根部尺寸大约为170 mm×70 mm×85 mm。

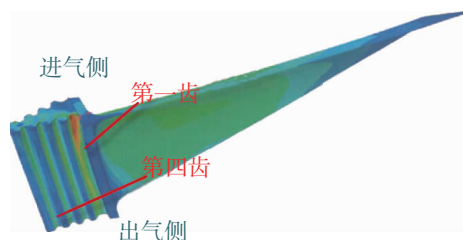


图2 汽轮机叶片的应力部位

1.2 相控阵探头的设计

相控阵超声探头的参数较多,各参数均对检验灵敏度产生影响,其中直接决定探头激发声束特性

的参数有:阵列类型,晶片数量,中心频率,晶片间隙,单一晶片尺寸,探头楔块角度,探头楔块声学性能。各参数与设计目标间的关系复杂,无法通过经验模式准确获得。近年来,计算机模拟技术高速发展,在超声波声场仿真方面的应用也得到无损检测界的广泛关注,并被逐步运用于超声检验过程(工艺的设计、检验结果分析、检验方法的评价等)^[2-3]。对探头采用仿真模拟,量化参数对探头激发声场的影响,准确选择最适合的探头参数,大幅减少研发周期,提高设计效率,降低研发成本都有重要意义。

晶片的频率会影响到探头激发声束的指向性和声束能量。以探头晶片的中心频率参数为例,通过模拟软件进行计算分析得出三种中心频率(低频/中频/高频)的探头发射声场,为中心频率选择提供参考。在相同条件下计算三种不同频率探头激发的声场,如图3所示。

图3(a)~(c)为工件中声压分布图形化显示,而图(d)显示的是距离检测面50 mm处的声压分布对比,由前三幅图可以看出,探头激发声束的指向性随着探头频率的增加而得到改善,理论上认为选择高频探头对检测结果的定位比较有利。但是,由声压对比图得出高频探头激发能量远低于其它两个频率的探头,反而降低了检测灵敏度,因此可以采用较高的检测灵敏度来弥补其劣势。最终还要结合叶片根部检测区域内缺陷回波仿真,综合考虑中心频率对检测分辨率、检测灵敏度及指向性的影响。采用声场仿真的方式还可用于探头晶片尺寸、斜楔块参数的设计,从而能方便快捷地完成整个探头参数设计。

根据扫查区域的不同,最终设计了纵波和横波两类探头,探头的中心频率均为5 MHz。由于叶片80%以上的扫查区域为复杂的空间曲面结构,为了保证探头与检测面的耦合,需要将探头设计的足够小。因此,将晶片数量设置为12,晶片长度设置为6 mm,晶片间隔设置为0.5 mm,探头的有效孔径约

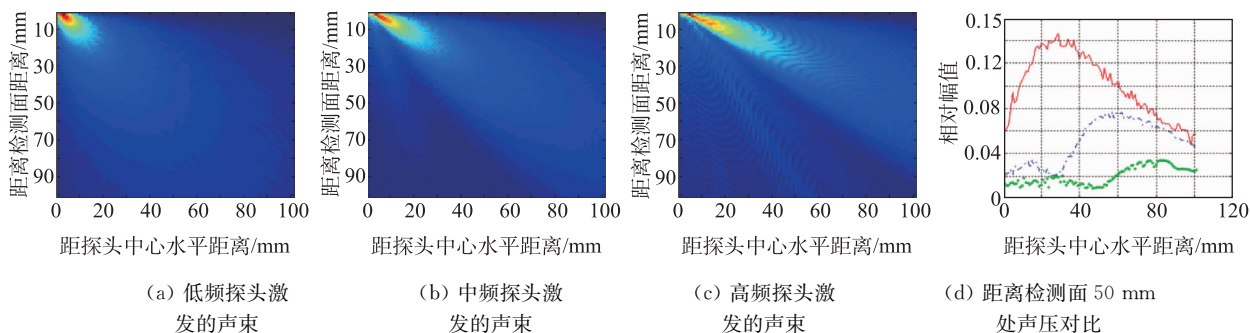


图3 晶片频率对探头激发声束的影响

为 36 mm。对于横波探头,为了获得高的纵/横波转换效率(透射系数 $\alpha = T/L$),需要为其设计合适的斜楔块(倾角为 36°)。考虑扫查空间的限制,针对不同的扫查区域还设计了相应的探头外形尺寸。

1.3 扫查方式的设计

采用完好的汽轮机叶片作为模拟试块,并在其叶片根部设置一系列的月牙槽,作为参考反射体,用来验证检测方案。第一齿是叶片失效的重点区域,需要重点关注。因此,在第一齿上内弧侧和外弧侧各设置 5 个不同规格的月牙槽,其中最小月牙槽的深度为 0.5 mm,最大月牙槽的深度为 1.5 mm。

结合设计好的相控阵探头和模拟试块,根据现场检测条件,设计四种扫查方式进行超声检测。

扫查方式 1:将带楔块探头放置在参考试块外弧侧叶身上,采用横波声束对准内弧径向方向进行扫查,如图 4(a)所示。扫查方式 2 为将带楔块探头放置在参考试块内弧侧叶身上,采用横波声束对准外弧径向方向进行扫查,如图 4(b)所示;扫查方式 3:将带楔块的探头放置在参考试块肩台上,采用横波声束对准外弧径向方向进行扫查,如图 4(c)所示;扫查方式 4:将不含楔块的探头放置在肩台上,采用纵波声束沿着外弧径向进行扫查,如图 4(d)所示。

2 试验结果及分析

针对模拟试块上的月牙槽分别采用相应的扫查方式对其进行检测,找到最大缺陷回波后记录探头位置和扫查结果,并在完好叶片相应位置记录结构回波的扫查结构,对比两次的检测结果,验证扫查工艺。

图 5(a)为采用扫查方式 1 检测第一齿内弧侧中

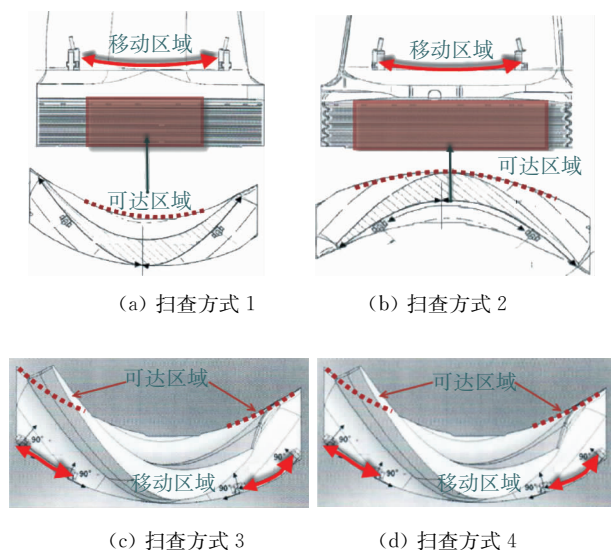


图 4 扫查方式示意图

部月牙槽(1.5 mm 深)的检测结果图。将缺陷信号调至 80% 的波高,其噪声信号幅值约为 2.4%,信噪比约为 30 dB,因此缺陷是显而易见的。图 5(b)为采用扫查方式 2 检测第一齿外弧侧中部月牙槽(1.5 mm 深)的检测结果图。将槽信号调至 80% 的波高,其噪声信号幅值约为 2.1%,信噪比约为 32 dB。图 5(c)为采用扫查方式 3 检测内弧进气侧(0.5 mm 深)月牙槽的检测结果图。将槽信号调至 80%,其噪声信号幅值约为 4.3%,信噪比约为 25 dB。图 5(d)为采用扫查方式 4 检测外弧出气侧月牙槽(0.5 mm 深)的检测结果图。将槽信号调至 80% 的波高,其噪声信号幅值约为 3.5%,信噪比约为 27 dB。

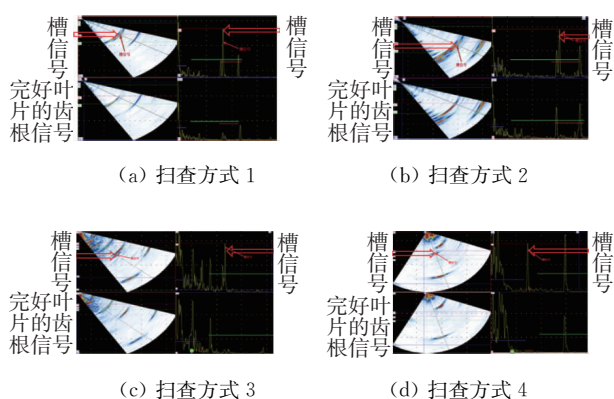


图 5 模拟试块检测试验结果

采用四种检测方式对末级和次末级叶片进行检测,并记录检测的灵敏度和信噪比。结果表明,将检测出所有月牙槽的信号幅值设置成 80% 时,信号灵敏度在仪器可调范围的中部区域(所用仪器灵敏度可调范围为 0~80 dB);相应的噪声信号较低,其幅值最高仅为 10%,最低为 1%。因此,所设计的扫查工艺能够清晰的检测出最小 0.5 mm 的月牙槽。

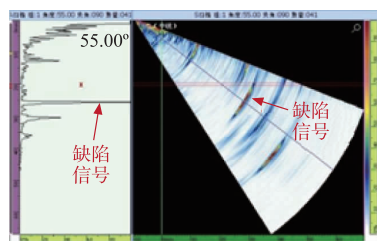
3 实际应用结果

将完成的检验技术应用于实际在役汽轮机叶片的无损检测。在国内某核电厂的汽轮机转子若干叶片根部发现缺陷信号,以其中一个叶片为例介绍检验及验证结果。

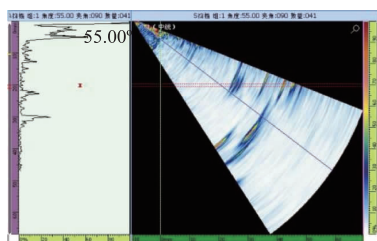
在叶片的进气口肩台上对第一齿内弧侧采用横波进行检测可得信号如图 6(a)所示,并将之与完好的同级叶片进行比较可发现明显的显示信号。借助三维结构模型分析可知该缺陷处于进气口第一齿(距离肩台检测面 28 mm,距离进气端面约 5 mm)。

为了进一步确认检测结果的准确性,将该叶片从转子上拆下,通过打磨和渗透显示处理得到明显

的裂纹显示,如图7所示。裂纹深约3 mm,并在齿



(a) 含缺陷叶片检测结果



(b) 同级完好叶片的检测到的结构信号

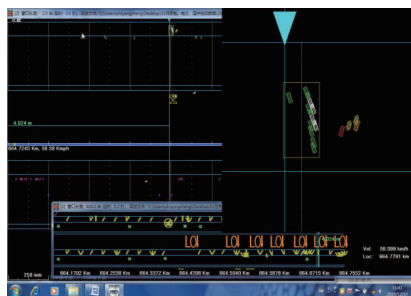
图6 扫查方式3横波相控阵探头信号对比



图7 拆卸打磨处理后的裂纹显示



(上接第37页)



(a) 探伤车检测偏于垂直的较小轨头核伤



(b) 断轨处照片

图4 某线路K664+710处轨头核伤

根方向延伸。由此证明在复杂的在役检测条件下,所设计的叶片根部相控阵检测技术可以有效的检测出真实的缺陷。

4 结论

针对复杂结构的汽轮机转子叶片根部缺陷开发出了一套相控阵检测技术。通过叶片运行应力分析,得出超声扫查的重点关注区域;采用声场仿真的手段量化了相控阵探头各参数与探头激发声场间的关系,并以此设计了针对枞树型叶片根部的专用相控阵探头;结合现场检测条件,针对不同检测部位设计出了四种扫查方式;在模拟试块上的检测试验表明,所设计的检测工艺能够清晰地检测出所有模拟试块中的月牙槽;将检测工艺应用于工程实际,结果证明了所设计的叶片根部相控阵检测技术是准确有效的。

参考文献:

- [1] 彭志珍,李玉龙,丰慧星. 压水堆核电站汽轮机叶根超声检测[J]. 机械与电子,2012(11):138-139.
- [2] 丁辉,张俊,张益成,等. 超声检测声场计算模型的建立与仿真软件的开发[J]. 无损检测,2009,31(8):614-618.
- [3] 单洪彬,李明,程怀东. 国外超声仿真软件的研究进展[J]. 无损检测,2008,30(7):1-6.

5 结论

钢轨探伤车的探伤检测属定性检测,检测速度快,在目前的探伤车标准体系模式和运用管理模式下,其轨头核伤的检测灵敏度不低于《钢轨探伤管理规则》中钢轨探伤仪对轨头核伤检测时设定的检测灵敏度。分析多年来的探伤车检测数据,在满足探伤条件的情况下,未发生过因灵敏度能力不足而漏检较大轨头核伤的事例。

参考文献:

- [1] 石永生,张全才,李杰,等. 探伤车与探伤仪的轨头核伤检测能力对比分析[J]. 铁路技术创新,2012(1):99-101.
- [2] 石永生,李培,钟旭峰,等. 钢轨踏面斜裂纹与轨头核伤的B型图对比分析[J]. 铁路技术创新,2012(1):92-95.
- [3] 中国机械工程学会无损检测分会. 超声波检测[M]. 北京:北京机械工业出版社,2000.
- [4] GB/T 28246-2012. 大型超声波钢轨探伤车[S].
- [5] 石永生. 依靠杂波设置探伤车检测标准的分析探讨[J]. 中国铁路,2013(5):67-70.